



TITLE:

Statistical mechanics for athermal fluctuation: Non-Gaussian noise in physics(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Kanazawa, Kiyoshi

CITATION:

Kanazawa, Kiyoshi. Statistical mechanics for athermal fluctuation: Non-Gaussian noise in physics. 京都大学, 2015, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2015-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18775>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により本文は2019-08-01に公開

(続紙 1)

京都大学	博 士（理 学）	氏名	金澤輝代士
論文題目	Statistical mechanics for athermal fluctuation: Non-Gaussian noise in physics (非熱的揺らぎの統計力学：物理における非ガウスノイズ)		
(論文内容の要旨)			
<p>ブラウン粒子は常に有限温度の環境を特徴付ける熱揺動の影響を受けている。このような揺動は平衡分布への緩和を保証するためにガウスの性質を充たし、その数学的表現のために白色ガウスノイズが用いられる。またガウスノイズを受けて運動する粒子に対する揺らぎのエネルギー論も整備され、様々な実験の記述に応用されている。</p> <p>一方で地震、粉体、生物系、電気回路等の多くの現象で現れるノイズは非ガウスの特徴を備えているが、従来の研究では非ガウスノイズの物理的な発生メカニズムや発生した際の揺動の影響を受けた粒子の挙動の理解は十分なものではなかった。本論文で申請者は、非ガウスノイズを生成する非熱的環境の統計力学の構築を目指し、非ガウスノイズに駆動される粒子に対する揺らぎのエネルギー論を論じている。</p> <p>本論文は全体の導入としての序論である第1章に続いてガウスノイズの場合に知られた事を申請者がまとめ直した前半（パート1）と、申請者の数々の公表論文に基づいたオリジナルな結果をまとめ直した後半（パート2）に分けられる。</p> <p>パート1の2章ではマルコフ的な確率過程の教科書的なレビューを行い、3章ではガウスの揺動を受ける粒子が従うランジュバン方程式のシステムサイズ展開に基づく導出を説明している。また4章ではガウスの揺動を受ける粒子の軌跡に対する確率的計算法をまとめ、5章では揺らぎの定理を含めた揺らぎのエネルギー論をまとめている。このパート1は既存の理論の再構築とはいいながら、著者のユニークな視点で簡潔かつ明快にまとめられる。</p> <p>パート2では、パート1で説明した既存の理論を踏まえて、非ガウスノイズを受けた粒子の統計的性質の詳細を説明している。まず6章では、2つの環境があって平衡環境が強く、非平衡環境が励起のみに寄与するときに、非ガウスノイズが重要になる事を示した。この章では平衡環境との摩擦は線形であると仮定して、システムサイズ展開法に基づき非ガウスノイズに駆動されるランジュバン方程式を導出し、またその際に中心極限定理がどのように破れるかを明示した。またその非ガウスランジュバン方程式を粉体ガス中のローターの問題に応用し、環境が指数関数になる場合のローターの回転角分布を解析的に求め、それがボルツマン・ローレンツ方程式の数値解と一致する事を示した。更にローターの回転角分布が分かった場合に環境を逆推定する方法論を開発し、その定量的有効性を示した。</p> <p>7章では6章の解析を更に平衡環境との摩擦がクーロン摩擦や3次の非線形摩擦のある場合に適用した。まずは一般論として強摩擦展開による摂動論が一種類のダイアグラムの繰り返しになる事を示した。更にその摂動展開の最低次が既存の独立キックモデルに帰着する事を示した。更にこれらの解析を6章同様に粉体ガス中のローターの回転角度分布の問題に適用し、その有効性を示した。</p> <p>8章では、申請者が新たに開発した非ガウスノイズのあるランジュバン系に必要な計算手法を詳細に説明している。そこでは従来のStratonovich積の一般化である新しい積記号を導入し、その結果通常の計算ルールが使えて、熱力学第一法則をカバーする揺らぎのエネルギー論を論じた。</p>			

(続紙 2)

9章では非ガウス熱浴をワイヤーで結んだ際のエネルギー流が、ワイヤーの詳細に依存する、即ち熱力学第ゼロ法則が存在しない事を示した。また非ガウス熱浴系の揺らぎの定理がどのような形になるかを求めた。

10章では電気回路に現れるアベランチノイズが典型的な非ガウスノイズである事を示し、更に外部パラメータを周期的に操作する事で、平衡熱浴と異なり空間的に対称な場合にもポンピングカレントが生じる事を示した。11章で全体をまとめ、計算の詳細をAppendices A-Eにまとめてある。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は160ページを超す大部のものであるが、英文もこなれたものである。特筆すべきは、パート1が既知の事実のまとめながら既存の教科書にない切り口で簡潔かつ自己完結した記述で新しい教科書と見做し得る優れた導入になっている。

またパート2のオリジナルな貢献はパート1で詳細にまとめたガウス熱浴の限界を踏まえたものであり、数学的にも注意深い記述を心がけながら常に非ガウスノイズが有効になる物理的状況がどのような場合かを意識している。その点で物理的実在を考慮せずレビ過程の数学的モデルによって非ガウスノイズを議論する既存の理論と一線を画する。特に6章では、中心極限定理の制約によって長時間的振舞は結局の処、ガウスノイズで特徴付けられるのではないかと批判に答えるべく、非ガウス熱浴とガウス熱浴の共存とガウス熱浴で決まる摩擦が強い状況で初めて非ガウスノイズが重要になるという点は申請者によって発見された重要な知見である。また、一般論に留まらず、その非ガウスノイズに駆動されたランジュバン方程式を粉体ガス中のローターの運動に適用し、その有効性を示した事は高く評価される。申請者の開発した逆推定の手法は容易に観測できるオブザーバブルから環境の特性を明らかにしようというユニークな視点からの研究で今後の発展が大いに期待される。更に6章での解析を7章では非線形摩擦系に拡張し、摂動論を整備し、その最低次で直感的に導入された既存のモデルを回復した点でも今後の更なる発展を期待させる。

また8章で詳細に述べられた申請者による非ガウスノイズを記述する数学的手法も既存の方法論の拡張であり、その注意深い解析により、後進の研究に対する新しい道標になるのではないかと期待される。また9章での非ガウスノイズによるエネルギー伝導の非自明な性質の発見や、10章での空間的対称性を持つエネルギーポンピングの発見も専門家をうならせるに足る新しい結果であり、理論家のみならず実験家も刺激している。このように申請者の学位論文は標準的な学生の学位論文の水準を超えるものと高く評価される。

勿論、申請者の主張するミクロからの導出の意味が必ずしもクリアではない点や本学位論文では白色ノイズに限定した解析を行った点に若干の不満は残るだろう。しかし、これらの点の改善は申請者並びに後進の今後の研究課題であると捉えるべきである。逆に言えば、本学位論文は丁寧な導入部も含めて、他に類のない非ガウスノイズの統計力学の教科書となり得るものである。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成27年1月14日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、投稿中の公表論文が受理されて印刷に回るまでの間、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降